Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 3, Fall 2024, p. 327-342

Effects of Some Stress Modulators (Methanol, Nano silicon, and Humic acid) on Yield, Activity of Some Antioxidant Enzymes and Biochemical Traits of Wheat in Different Irrigation Regimes

R. Seyed Sharifi[1*], M. Ghasemi Kalkhoran[2], H. Narimani[3]

1- Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2- Assistant Professor, Horticulture Crops Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil. Iran
3- PhD graduate, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(*- Corresponding Author Email: raouf_ssharifi@yahoo.com)

Received: 15 January 2024 Revised: 09 March 2024 Accepted: 12 March 2024 Available Online: 13 April 2024	**How to cite this article:** Seyed Sharifi, R., Ghasemi Kalkhoran, M., & Gasemi, H. (2024). Effects of Some Stress Modulators (Methanol, Nano silicon, and Humic acid) on Yield, Activity of Some Antioxidant Enzymes and Biochemical Traits of Wheat in Different Irrigation Regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *22*(3), 327-342. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.86431.1299

Introduction

Drought stress is one of the most common limiting factors for crop production. Due to its detrimental effects on numerous physiological and biochemical processes, this stress restricts the growth and development of plants. In this regard, the application of stress modulators (methanol, silicon and humic acid) has been found to enhance plant growth and grain yield while also increasing its resistance to abiotic stresses. On the other hand, stress modulators can lessen the effects of stress toxic by reducing malondialdehyde and hydrogen peroxide accumulation and keeping the effectiveness of the photosynthetic apparatus. Therefore, measurement of traits of such as antioxidant enzymes activity, chlorophyll content, proline and soluble sugars content, malondialdehyde content, electrical conductivity are as indicators of plant response to environmental stress. Although, several strategies have been developed to decrease the effects caused by drought stress on plant growth. But, among them, the application of stress modulators (methanol, nano silicon, and humic acid) plays a very important role in yield improvement. The aim of this study was to evaluate the effects of foliar application of stress modulators (methanol, nano silicon and humic acid) on the activity of antioxidant enzymes, compatible osmolytes, photosynthetic pigments content and grain yield of wheat in different irrigation regimes.

Materials and Methods

an experiment as factorial was conducted based on randomized complete block design with three replications in Agricultural and Natural Resources Research Station of Ardabil, Ardabil, Iran, in 2022-2023 growth season. The treatments were different irrigation regimes (normal irrigation as control; irrigation withholding at 50% of booting and heading stages) and foliar spraying of stress modulators (foliar spraying with water, foliar spraying of methanol (25% volume), nano silicon (50 $mg.L^{-1}$), humic acid (300 $mg.L^{-1}$), foliar spraying of methanol and silicon, methanol and humic acid, nano silicon and humic, methanol with nano silicon and humic acid). In each plot, there were six rows with two m long. In this experiment, the wheat cultivar ‘Hiran’ was employed. For this cultivar, 400 $seeds.m^{-2}$ is the optimum density. The used nano silicon had an average particle size of less than 30

https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.86431.1299

nm and the special surface of particles was more than 30 $m^2.g^{-1}$. They were product of Nanomaterial US Research which was provided by Pishgaman Nanomaterials Company of Iran. For a better solution, deionized water was mixed with nano Si powder and placed on a shaker with ultrasonic equipment (100 W and 40 kHz). Two phases of period growth, BBCH 21 and 30 were used for the foliar application of nano silicon. In this study, the activity of antioxidant enzymes (Catalase, peroxidase, and Polyphenol oxidase), compatible osmolytes (Proline and soluble sugars), photosynthetic pigments content (Chlorophyll a, Chlorophyll b, total chlorophyll, and carotenoid), H_2O_2, MDA, protein content and grain yield of wheat were investigated.

Results and Discussion

The result indicated that both application stress modulators (methanol, silicon and humic acid) at irrigation withholding in booting stage decreased malondialdehyde content (39.79%) and electrical conductivity (31.25%), but increased activity of peroxidase (4.89%), polyphenol oxidase (7.73%) enzymes, soluble sugars (22.15%), chlorophyll a (33.48%), chlorophyll b (24.96%), leaf protein content (25.09%) and grain yield (36.21%) in compared to the no application of stress modulators under irrigation withholding in booting stage.

Conclusion

According to our findings, applying stress modulators (methanol, silicon and humic acid) under water limitation often reduced this damage by strengthening the defensive mechanisms, particularly antioxidant enzymes and compatible osmolytes (Proline and soluble sugars). In summary, our results indicated that application of stress modulators upgrade plant physiology and trigger the cellular defense of wheat plants against severe water limitation. Therefore, in can be suggested that applying stress modulators as individual and integrated could enhance grain yield of wheat under water limitation conditions due to improving of physiological and biochemical characteristics.

Keywords: Catalase, Drought, Malondialdehyde, Proline, Soluble sugars

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، ص ۳۴۲-۳۲۷

تاثیر برخی تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) بر عملکرد، فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات بیوشیمیایی گندم در رژیم‌های مختلف آبیاری

رئوف سید شریفی[1*]، معرفت قاسمی کلخوران[2]، حامد نریمانی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

چکیده

تنش خشکی یکی از رایج‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات زراعی است. از این‌رو، توسعه روش‌ها و راهکارها برای کاهش اثر تنش خشکی بر بازده گیاهان زراعی ضروری است. برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی می‌توان از متانول، نانوسیلیکون و اسید هیومیک استفاده کرد. تنش خشکی غشاهای سلولی، سیستم فتوسنتزی، جذب آب و عناصر و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی را مختل می‌کند که همگی بر رشد گیاه، عملکردهای فیزیولوژیکی و فرآیندهای متابولیک تأثیر منفی دارند. در این راستا، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی رژیم‌های مختلف آبیاری (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل تورم غلاف برگ پرچم و ظهور سنبله به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی) و محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی متانول (۲۵ درصد حجمی)، نانوسیلیکون (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، هیومیک اسید (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، محلول‌پاشی متانول و نانوسیلیکون، محلول‌پاشی متانول و هیومیک اسید، محلول‌پاشی نانوسیلیکون با هیومیک اسید، محلول‌پاشی متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) را شامل می‌شدند. نتایج نشان داد محلول‌پاشی توام تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) در شرایط قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم، محتوای مالون‌دی‌آلدهید (۳۹/۷۹ درصد) و هدایت الکتریکی برگ پرچم (۳۱/۲۵ درصد) را کاهش ولی فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز (۴/۸۹ درصد)، پلی‌فنل‌اکسیداز (۷/۷۳ درصد)، محتوای قندهای محلول (۲۲/۱۵ درصد)، کلروفیل a (۳۳/۴۸ درصد)، کلروفیل b (۲۴/۹۶ درصد) و محتوای پروتئین برگ (۲۵/۰۹ درصد) و عملکرد دانه (۳۶/۲۱ درصد) را در مقایسه با عدم محلول‌پاشی توام تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم، افزایش داد. به‌نظر می‌رسد کاربرد منفرد و تلفیقی تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید)، می‌تواند عملکرد دانه گندم را تحت شرایط محدودیت آبی به‌واسطه بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، اسمولیت‌های سازگار و رنگیزه‌های فتوسنتزی افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: پرولین، خشکی، قندهای محلول، کاتالاز، مالون‌دی‌آلدهید

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از گیاهان زراعی پرمصرف در تامین انرژی و پروتئین مورد نیاز جوامع بشری است. رشد روزافزون جمعیت و افزایش قیمت گندم، ضرورت دستیابی به افزایش عملکرد این گیاه در واحد سطح را بیش از پیش نشان می‌دهد و این در حالی است که بیش‌ترین سطح زیر کشت این گیاه در کشور در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد (Seyed Sharifi & Khalilzadeh, 2018) و در این مناطق، محدودیت آبی از عوامل اصلی کاهش رشد و عملکرد این گیاه محسوب شده و با ایجاد تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و متابولیکی در گیاهان، موجب اختلال در متابولیسم کلروفیل، القای تنش اکسیداتیو، کاهش محتوای کلروفیل، افت مقادیر پروتئین‌های محلول، تغییر نسبت کلروفیل a به b، افزایش گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداسیون لیپیدی و صدمات غشایی (افزایش نشت غشاها)

۱- استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲-استادیار بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران
۳- دکترای فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: raouf_ssharifi@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.86431.1299

می‌شود (Ahluwalia, Singh, & Bhatia, 2021). به بیانی دیگر گیاهان در مناطق نیمه‌خشک و خشک گرچه دسترسی کمتری به آب دارند ولی، امروزه تغییرات اقلیمی موجب شده است که تمامی گیاهان حتی گیاهانی که در مناطق معتدل نیز قرار می‌گیرند، در طول دوره رشد خود با تنش آبی روبه‌رو شوند. در چنین شرایطی کاربرد برخی تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) با تجمع اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرولین و قندهای محلول)، افزایش محتوای کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، ضمن جلوگیری از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، موجب حفظ ثبات و پایداری غشای سلولی می‌شود (Korgaonkar & Bhandari, 2023). در این راستا آقایی و همکاران (Aghaei, Seyed Sharifi, Khomari, & Narimani, 2021) گزارش کردند که کاربرد متانول در شرایط آبیاری کامل منجر به افزایش ۱۹/۳ درصدی عملکرد دانه گندم در مقایسه با عدم کاربرد متانول در همین سطح از سطوح آبیاری شد و اظهار داشتند که محلول‌پاشی ۳۰ درصد حجمی متانول در شرایط آبیاری کامل موجب افزایش ۴۶/۹۸ درصدی عملکرد دانه نسبت به عدم محلول‌پاشی تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم شد. شاهمارزاده و همکاران (Shahmarzadeh, Seyed Sharifi, & Sedghi, 2022) عنوان داشتند که هیومیک اسید به علت فراهمی بهتر مواد غذایی قابل دسترس گندم، می‌تواند منجر به بهبود عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل و محدودیت ملایم و شدید آبی شود. نتایج مشابهی نیز مبنی بر بهبود عملکرد دانه تریتیکاله (X *Triticosecale* Wittmack) در هر دو شرایط آبیاری کامل و محدودیت آبی با کاربرد نانوسیلیکون توسط دیگر محققان گزارش شده است (Nazari, Seyed Sharifi, Narimani, & Mohammadi Kale Sarlou, 2022).

حسین‌زاده و همکاران (Hossinzadeh, Salimi, Ganjali, & Ahmadpour, 2015) اظهار داشتند که افزایش محتوای پراکسید هیدروژن در شرایط تنش خشکی، موجب کاهش محتوای پروتئین در برگ‌ها شد، هرچند در چنین شرایطی گیاه با افزایش محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قندهای محلول)، توانست از کاهش بیشتر محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ جلوگیری کند. همچنین در شرایط محدودیت آبی، بسته شدن روزنه‌ها به‌منظور کاهش تعرق و جلوگیری از تلفات آبی بیشتر، موجب کاهش ورود دی‌اکسیدکربن به سلول‌های برگی و در نتیجه کاهش فتوسنتز می‌شود (Rahbarian, Khavari-Nejad, Ganjeali, Bagheri, & Najafi, 2011). در چنین وضعیتی کاربرد متانول یکی از راه‌کارهای موثر در افزایش تثبیت CO_2 در گیاهان و بهبود فتوسنتز و عملکرد است. کوچکی مولکول‌های متانول نسبت به دی‌اکسیدکربن و متابولیزه شدن سریع آن به دی‌اکسیدکربن در بافت‌های گیاهی (Galbally & Kirstine, 2002) موجب شده است تا از محلول‌پاشی متانول به‌عنوان یک منبع غنی از CO_2 در جهت افزایش میل ترکیبی بیشتر روبیسکو با مولکول‌های CO_2 نسبت به O_2 استفاده شود تا ضمن افزایش فتوسنتز، منجر به کاهش تنفس نوری، کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن (Saneinejad, Tohidi, Habibi Khaniani, Sadeghi, & Khoramian, 2019) و بهبود مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی استفاده شود (Dorokhov, Sheshukova, & Komarova, 2018). در پژوهشی، محلول‌پاشی بوته‌های نخود (*Cicer arietinum* L.) با متانول، موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز)، پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید و افزایش محتوای پروتئین، پرولین و قندهای محلول در گیاه شد (Hossinzadeh *et al*, 2015).

یکی دیگر از راه‌کارهای بهبود عملکرد گیاهان زراعی در شرایط محدودیت آبی، کاربرد نانوسیلیکون می‌باشد که با رسوب در بافت‌های گیاهی و تقویت ضخامت دیواره‌های سلولی و محتوای لیگنین در کورتکس و آوندهای چوبی، تسهیل نقل و انتقال آب و عناصر غذایی، تنظیم شدت فتوسنتز و تنفس، به افزایش رشد و نمو و مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی، کمک می‌کند (Xu, Huang, Guo, Wang, & Zhan, 2023). همچنین از طریق بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان نظیر افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، جذب دی‌اکسیدکربن، بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و فرآیندهای فتوسنتزی گیاه، عملکرد دانه را افزایش می‌دهد (Okeke *et al*., 2023). نینگ و همکاران (Ning *et al*., 2023) بیان کردند که محلول‌پاشی سیلیکون در شرایط محدودیت آبی، تجمع پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپیدی را کاهش داده و از طریق بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، موجب افزایش محتوای پروتئین برگ و عملکرد دانه گندم شد. نظری و همکاران (Nazari *et al*., 2022) افزایش عملکرد دانه تریتیکاله در شرایط محدودیت آبی به‌واسطه محلول‌پاشی با نانوسیلیکون را، به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای پرولین و قندهای محلول، و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی نسبت دادند.

یکی دیگر از روش‌های توصیه‌شده برای بهبود عملکرد در مناطق برخوردار از محدودیت آبی، کاربرد هیومیک اسید است که با افزایش نفوذپذیری غشای سلولی ریشه، توانایی جذب آب و مواد غذایی را افزایش داده (Aggag, Alzoheiry, & Abdallah, 2015) و با اصلاح فیزیکی و بهبود دانه‌بندی و ایجاد فضای بیشتری برای نفوذ و نگهداری زیادتر آب در خاک، ضمن انحلال و آزادسازی عناصر ماکرو و میکرو در خاک، موجب افزایش هورمون‌های اکسین، سیتوکنین و جیبرلین در گیاه و مقاومت به محدودیت آبی می‌شود (Abdel Mawgoud, El Greadly, Helmy, & Singer, 2007). هیومیک اسید با افزایش محتوای کلروفیل و انتقال مواد فتوسنتزی، موجب

بهبود رشد و عملکرد در گیاهان می‌شود (Yuan *et al*., 2017). مانال و همکاران (Manal, Thalooth, Amal, Magda, & Elewa, 2016) اظهار داشتند محلول‌پاشی هیومیک اسید موجب افزایش وزن هزار دانه، ارتفاع بوته و عملکرد دانه گندم شد. گزارش شده است کاربرد هیومیک اسید از طریق بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرولین و قندهای محلول)، کاهش پراکسیداسیون لیپیدی یا محتوای مالون‌دی‌آلدهید، نشت الکترولیت از سلول را کاهش می‌دهد (Abu-Ria *et al*., 2023). محمدی کله‌سرلو همکاران (Mohammadi Kale Sarlou, Seyed Sharifi, & Narimani, 2022) اظهار داشتند که محلول‌پاشی هیومیک اسید از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) و محتوای اسمولیت‌های سازگار، ضمن کاهش تجمع پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید، موجب افزایش عملکرد دانه تریتیکاله شد.

اهمیت گندم به‌عنوان یکی از محصولات استراتژیک کشور و نقشی که متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید در تعدیل بخشی از کاهش عملکرد ناشی از محدودیت آبی دارند و بررسی‌های محدود انجام شده در این راستا، از جمله مواردی بودند که موجب شد تا اثر برخی تعدیل‌کننده‌های تنش بر عملکرد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و برخی صفات بیوشیمیایی گندم در شرایط محدودیت آبی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل (آلاروق) با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی، با اقلیم نیمه‌خشک و سرد با ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا شد. خاک منطقه آزمایشی با عمق حدود ۷۰ سانتی‌متر جزو خاک‌های لومی رسی با pH حدود ۷/۷ است. نتایج تجزیه خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ و شرایط اقلیمی منطقه در طول دوره رشدی گندم در جدول ۲ آورده شده است.

عامل‌های آزمایشی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل تورم غلاف برگ پرچم و ظهور سنبله به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی معادل کد ۴۳ و ۵۵ از مقیاس BBCH) و محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش در هشت سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی متانول (۲۵ درصد حجمی)، نانوسیلیکون (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، هیومیک اسید (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، محلول‌پاشی متانول و نانوسیلیکون، محلول‌پاشی متانول و هیومیک اسید، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و هیومیک اسید، محلول‌پاشی متانول با نانوسیلیکون و هیومیک اسید) را شامل می‌شدند. مبنای انتخاب سطح هریک از تعدیل‌کننده‌های تنش، به استناد مقالاتی بود که کاربرد این سطح از تعدیل کننده تنش، از حداکثر عملکرد برخوردار بود (Aghaei *et al*., 2021; Ahmadi-Nouraldinvand, Seyed Sharif, Siadat, & Khalilzadeh, 2023; Shahmarzadeh *et al*., 2022).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

Table 1- Soil physico-chemical characteristics

ویژگی Characteristic	نیتروژن N	کربن آلی O.C	آهک CaCO3	هدایت الکتریکی EC (dS.m-1)	پتاسیم P	فسفر K	pH	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand
		%			mg kg-1				%	
مقدار Amount	0.08	0.858	5	1.54	495	12.2	7.76	39	30	31

جدول ۲- مشخصات جوی در طول دوره رشدی

Table 2- Atmospheric characteristics during growth

پارامتر Parameter	مهر Oct.	آبان Nov.	آذر Dec.	دی Jan.	بهمن Feb.	اسفند Mar.
Rainfall (mm) بارندگی	21.1	13	6.5	18.7	6.9	30.5
Temperature mean (°C) میانگین دما	16	8.7	4.4	-1.6	-1.4	8.5
Sunny hours ساعات آفتابی	7.3	6.1	4.6	4.9	5.7	6.6
Relative humidity mean (٪) متوسط رطوبت نسبی	66.6	73.4	72.8	73.9	71.6	59.8
پارامتر Parameter	فروردین Apr.	اردیبهشت May	خرداد Jun	تیر Jul	مرداد Aug	شهریور Sep
Rainfall (mm) بارندگی	8.4	76	36.8	3.5	2.2	9.2
Temperature mean (°C) میانگین دما	10.4	13.9	18.3	18.3	20.4	17.2
Sunny hours ساعات آفتابی	7	7.8	8.4	10.3	11.3	7.8
Relative humidity mean (٪) متوسط رطوبت نسبی	63.8	65.6	69	66.6	55.4	72.8

با توجه به این‌که بهترین زمان محلول‌پاشی با متانول ساعت ۱۰ تا ۱۲ در روشنایی است تا حداکثر فتوسنتز انجام شود و نقش متانول بر صفات مورد ارزیابی بهتر نمایان شود (Nonomura & Benson, 1992)، از این‌رو همه واحدهای آزمایشی در این محدوده زمانی محلول‌پاشی شدند. به‌منظور نفوذ بهتر هریک از محلول‌های تهیه‌شده از تعدیل‌کننده‌های تنش با اندام‌های هوایی، سعی شد که محلول‌پاشی با فاصله ۲۴ ساعت از همدیگر انجام شود. کاشت در ۱۰ آبان ماه ۱۴۰۱ و برداشت چهارم مرداد ماه ۱۴۰۲ بود. از گندم رقم حیران با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع (که تراکم مطلوب و توصیه‌شده برای این رقم است) استفاده شد. این رقم با میانگین ارتفاع بوته ۹۱ سانتی‌متر نسبت به خوابیدگی مقاوم و از کیفیت نانوایی خوبی برخوردار است. بذر این رقم از ایستگاه تحقیقات جهاد کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل (آلاروق) تهیه شد. هر واحد آزمایشی شامل شش خط کاشت به طول دو متر با فاصله بین ردیفی ۲۰ سانتی‌متر بود. به‌منظور جلوگیری از نشت آب به کرت‌های مجاور، فاصله بین هر واحد آزمایشی یک متر و نیم در نظر گرفته شد. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی، نیاز گیاه و سطوح تیمار کم‌آبیاری انجام شد. محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) در مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی (به‌ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس BBCH) انجام شد. به‌منظور جلوگیری از صدمات ناشی از سمیت متانول، به هرکدام از محلول‌های تهیه‌شده با متانول، دو گرم در لیتر گلایسین اضافه شد. نانوسیلیکون (SiO2-Nano) محصول شرکت Nanomaterial US Research بود که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه و ویژگی‌های آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات نانوسیلیکون

Table 3- Nano silicon properties

نوع نانوذره Type of nanoparticles	رنگ Color	سطح ویژه ذرات Specific surface area of particles	میانگین اندازه ذرات (nm) Average particle size	خلوص (%) Purity	وزن (g) Weight
نانوسیلیکون Nano Silicon	پودری سفید White powder	> 30 $m^2.g^{-1}$	20-30	99	50

در طول دوره رشد علف‌های هرز به روش دستی کنترل شدند و آفت خاصی در مزرعه مشاهده نشد. دو هفته بعد از قطع آبیاری در مرحله ظهور سنبله (BBCH ۶۱) نسبت به اندازه‌گیری صفات مورد بررسی بر روی برگ پرچم اقدام شد. در این راستا اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) به روش سودهکار و همکاران (Sudhakar, Lakshmi, & Giridara Kumar, 2001)، محتوای پراکسیدهیدروژن به روش الکسیو و همکاران (Alexieva, Sergiev, Mapelli, & Karanov, 2001)، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی به روش آرنون (Arnon, 1949)، محتوای مالون‌دی‌آلدهید به روش استوارت و بولی (Stewart & Beweley, 1980)، محتوای قندهای محلول به روش دابویس و همکاران (Dubios, Gilles, Hamilton, Roberts, & Smith, 1956)، محتوای پرولین به روش بیتز و همکاران (Bates, Walderen, & Taere, 1973) و پروتئین برگ پرچم به روش برادفورد (Bradford, 1976) اندازه‌گیری شد.

هدایت الکتریکی برگ پرچم نیز از دو هفته بعد از قطع آبیاری در مرحله ظهور سنبله (BBCH ۶۱) اندازه‌گیری شد. برای این منظور در هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی چهار برگ پرچم توسعه‌یافته و برخوردار از ابعاد یکسان انتخاب و بلافاصله درون یخ قرار گرفته و به آزمایشگاه منتقل شدند، سپس در بشرهای محتوای ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر (دارای EC مشخص) به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (۲۳±۲°C) قرار داده‌شده و سپس هدایت الکتریکی توسط دستگاه ECمتر (Mi 180 Bench Meter) اندازه‌گیری شد. عملکرد دانه نیز از سطحی معادل یک مترمربع برآورد شد. تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید)، سطوح آبیاری و برهم‌کنش توام این عوامل بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز)، محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). همچنین برهم‌کنش توام محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش و سطوح آبیاری بر صفات هدایت الکتریکی، محتوای قندهای محلول، کلروفیل a، کلروفیل b، درصد پروتئین برگ پرچم و عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). اثرات اصلی محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش و سطوح آبیاری بر فعالیت آنزیم کاتالاز، محتوای پرولین، کلروفیل کل،

کاروتنوئید برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پراکسید هیدروژن برگ پرچم

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد محلول‌پاشی توام نانوسیلیکون با هیومیک اسید در شرایط محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم) از بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز برگ پرچم (به‌ترتیب ۷۲/۴ و ۵۸/۵۶ تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) و از افزایش به‌ترتیب ۸/۸ و ۱۰/۴۴ درصدی فعالیت این آنزیم‌ها نسبت به عدم کاربرد این تعدیل‌کننده‌های تنش در همین سطح از آبیاری برخوردار بود (جدول ۶). بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در محلول‌پاشی هیومیک اسید (۳۰/۱۹ تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) و قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم (۲۹/۹۹ تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) مشاهده شد (جدول ۷). همچنین، محلول‌پاشی توام تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) در شرایط محدودیت شدید آبی، موجب افزایش ۲۴/۳۱ درصدی محتوای پراکسید هیدروژن برگ پرچم نسبت به عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش در همین سطح از آبیاری شد (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد محدودیت آبی به‌دلیل ایجاد اختلال در وضعیت آبی گیاه و بسته شدن روزنه‌ها، منجر به تجمع ترکیبات احیاءشده‌ی ناقل‌های الکترون می‌گردد. تجمع چنین ترکیباتی با افزایش احیای اکسیژن مولکولی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن[1] مانند سوپراکسید (جدول ۶) و رادیکال‌های هیدروکسیل، موجب به‌وجود آمدن صدمات اکسیداتیو، افزایش پراکسیداسیون لیپیدی (جدول ۶) و تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی (جدول ۶ و ۷) می‌شود. در چنین شرایطی گیاهان جهت جلوگیری از تجمع بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهند (Turan, Ekinci, Argin, Brinza, & Yildirim, 2023) و در این زمینه گیاهانی که توانایی مقاومت بالایی در برابر عوامل تنش‌زا دارند، سیستم آنتی‌اکسیدانی کارآمدی داشته و به‌هنگام بروز شرایطی که منجر به تنش اکسیداتیو می‌گردد، محتوای درونی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی را به‌صورت موثری بالا می‌برند. به‌نظر می‌رسد متانول محلول‌پاشی‌شده بر روی گیاه به‌دلیل متابولیزه شدن سریع آن به دی‌اکسیدکربن در بافت‌های گیاهی (Galbally & Kirstine, 2002)، موجب افزایش غلظت CO_2 درون سلول‌های برگی شده و با انجام عمل فتوسنتز به نحو مطلوب، منجر به مصرف NADPH تولیدشده در زنجیره انتقال الکترون می‌شود، بدین ترتیب ضمن جلوگیری از تجمع آن در کلروپلاست سلول‌های برگی و کاهش تشکیل سوپراکسید، موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Narimani, Seyed Sharifi, & Aghaei, 2020). ما و همکاران (Ma et al., 2015) اظهار داشتند، به‌واسطه‌ی تاثیری که کاربرد منابع خارجی سیلیکون بر روی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گندم در شرایط تنش خشکی دارد، مقادیر پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید در حضور سیلیکون کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد که در واقع می‌تواند دلیلی بر پایداری غشاهای سلولی و حفظ کارکرد آن‌ها در حضور عوامل تنش‌زا باشد. بخشی از بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به‌واسطه کاربرد هیومیک اسید (جدول ۶ و ۷)، می‌تواند با نقش کاربردی آن به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان و فعال‌کننده اکسین مرتبط باشد (Cordeiro, Santa-Catarina, Silveira, & de Souza, 2011).

هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم

کم‌ترین محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم (به‌ترتیب ۰/۱۶۶، ۰/۱۷۸ و ۰/۱۹۶ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) در هر یک از سطوح آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم) در کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) مشاهده شد (جدول ۶).

نتایج نشان داد تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم، محلول‌پاشی توام متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید موجب کاهش به‌ترتیب ۳۹/۷۹ و ۳۱/۲۵ درصدی محتوای مالون‌دی‌آلدهید و هدایت الکتریکی برگ پرچم نسبت به عدم محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش در همین سطح از آبیاری شد (جدول ۶). از آن‌جایی‌که محدودیت آبی، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن از جمله پراکسیدهیدروژن، آنیون سوپراکسید و رادیکال‌های هیدروکسیل را در گیاهان افزایش می‌دهد از این‌رو تجمع این ترکیبات، می‌تواند منجر به پراکسیداسیون لیپیدی غشاء و افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدهید شود (Liu et al., 2023). برخی محققان اظهار داشتند که در شرایط محدودیت آبی، افزایش سنتز هورمون آبسیزیک‌اسید و اختلال در جذب عناصر غذایی، موجب افت سرعت فتوسنتز و افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود و همین عوامل می‌تواند در چنین شرایطی پراکسیداسیون لیپیدی را افزایش دهد (Turan et al, 2023). آلدسوگوی و قانم (Aldesuquy & Ghanem, 2015) اظهار داشتند که تنش خشکی در گندم پراکسیداسیون لیپیدها و هدایت الکتریکی را افزایش داده و در نتیجه پایداری غشاهای سلولی را به‌صورت قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

1- Reactive Oxygen Species (ROS)

جدول ٤- تجزیه واریانس تاثیر تعدیل‌کننده‌های تنش بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و برخی صفات بیوشیمیایی گندم تحت سطوح مختلف آبیاری

Table 4- Analysis of variance of the effects of stress modifiers on activity of antioxidant enzymes and some biochemical traits of wheat under irrigation different levels

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	Mean Square میانگین مربعات					
		کاتالاز Catalase	پراکسیداز Peroxidase	پلی‌فنل‌اکسیداز Polyphenol oxidase	پراکسید هیدروژن H_2O_2	مالون‌دی‌آلدهید MDA	هدایت الکتریکی EC
Replication تکرار	2	16*	759.6**	412.9**	0.00163**	0.0256**	3335**
Irrigation (I) آبیاری	2	175.3**	594.3**	318.5**	0.0077**	0.0091**	5025.7**
Foliar (F) محلول‌پاشی application	7	38.9**	106.1**	63.8**	0.0048**	0.0042**	1409.1**
I×F	14	5.1ns	31.2**	17.7**	0.001**	0.0007**	219.4*
Error خطا	46	3.3	12.3	6.8	0.0004	0.0002	100.4
CV (%) ضریب تغییرات		6.7	5.6	5.2	6.5	7.8	7.1

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ٥- تجزیه واریانس تاثیر تعدیل‌کننده‌های تنش بر محتوای اسمولیت‌های سازگار، رنگیزه‌های فتوسنتزی، پروتئین و عملکرد دانه گندم تحت سطوح مختلف آبیاری

Table 5- Analysis of variance of the effects of stress modifiers on compatible osmolytes, photosynthetic pigments, and protein content and grain yield of wheat under irrigation different levels

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	Mean Square میانگین مربعات							
		پرولین Proline	قندهای محلول Soluble sugars	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	پروتئین Protein	عملکرد دانه Grain Yield
تکرار Replication	2	5.82**	146.7ns	0.923**	0.444**	0.231**	0.0027**	4.1**	10854.6**
آبیاری (I) Irrigation	2	4.27**	1215.1**	1.221**	0.11**	2.063**	0.013**	14.7**	31491.9**
محلول‌پاشی (F) Foliar application	7	2.98**	672.7**	0.612**	0.14**	1.137**	0.0059**	3.8**	14168.6**
I×F	14	0.45ns	143.3*	0.086*	0.015*	0.057ns	0.0004ns	1.1*	3570.8*
Error خطا	46	0.4	69.4	0.042	0.006	0.043	0.0004	0.6	1522.78
CV (%) ضریب تغییرات		8.5	7.2	8.1	5.1	5.0	5.7	6.1	8.2

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ٦- مقایسه میانگین تاثیر تعدیل‌کننده‌های تنش بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و برخی صفات بیوشیمیایی گندم تحت سطوح مختلف آبیاری

Table 6- Means comparison of effects of stress modifiers on activity of antioxidant enzymes and some biochemical traits of wheat under irrigation different levels

تیمار treatment	پراکسیداز (OD µg protein min^{-1})** POD	پلی‌فنل اکسیداز (OD µg protein min^{-1})** PPD	پراکسید هیدروژن (µmol.gFW^{-1}) H_2O_2	مالون دی‌آلدهید** (µmol.gFW^{-1}) MDA	هدایت الکتریکی* (µS.m^{-1}) EC	قندهای محلول* (mg g^{-1}FW) Soluble sugars	کلروفیل a* (mg g^{-1} FW) Chlorophyll a	کلروفیل b* (mg g^{-1} FW) Chlorophyll b	پروتئین برگ پرچم* (%) Protein	عملکرد دانه* (g.m^{-2}) Grain yield
$I_1 \times F_1$	52.26g	43.57 fg	0.33a-d	0.234a-e	156.5a-f	92.79f	2.425c-h	1.465f-i	11.9d	439.4c-f
$I_1 \times F_2$	63.61a-f	42.55g	0.306a-g	0.209b-h	138.8b-j	101.94c-f	2.673a-g	1.542d-i	12.09cd	481.1a-f
$I_1 \times F_3$	58.27d-g	47.48c-g	0.298b-f	0.206b-h	153.5a-g	93.88ef	2.873a-e	1.614b-h	13.69a-c	491.6a-f
$I_1 \times F_4$	61.91a-g	49.87b-g	0.325a-d	0.186e-h	128.4e-j	103.29b-f	2.738a-f	1.719a-f	13.22a-d	535.5a-d
$I_1 \times F_5$	54.7gf	45.24e-g	0.256e-g	0.169gh	116.6hij	109.43b-f	2.327d-h	1.879a	14.07ab	572.2ab
$I_1 \times F_6$	55.3fg	50.85a-f	0.268d-g	0.212b-h	112.7ij	118.07a-f	3.124ab	1.578c-i	14.16ab	508.3a-e
$I_1 \times F_7$	65.47a-f	52.88a-d	0.249g	0.167h	118.3hij	117.03b-f	3.018a-c	1.845ab	14.72a	572.2ab
$I_1 \times F_8$	56.1e-g	45.31e-g	0.253fg	0.166h	111.2j	122.92bcd	3.215a	1.835a-c	14.25ab	592.2a
$I_2 \times F_1$	58.15d-g	50.13b-g	0.324a-d	0.256ab	138.7b-j	99.44hi	2.327d-h	1.396hi	12.66b-d	395ef
$I_2 \times F_2$	64.18a-f	47.57c-g	0.348ab	0.236a-e	132.7c-j	106.11f-i	2.247e-h	1.503e-i	11.9d	432.7c-f
$I_2 \times F_3$	62.61a-g	50.7a-f	0.333a-c	0.228a-f	143.6a-i	108.21e-h	2.461c-h	1.547d-i	12.09cd	452.2b-e
$I_2 \times F_4$	63.61a-f	54.05a-d	0.318a-e	0.217b-h	153.2a-g	114.82c-g	2.77a-f	1.513e-i	12cd	465b-f
$I_2 \times F_5$	54.79fg	46.05d-g	0.28c-g	0.229a-f	125.1f-j	126.39a-c	2.181f-h	1.59b-h	13.22a-d	543.3a-c
$I_2 \times F_6$	55.92e-g	46.55d-g	0.304a-g	0.189d-h	131.4f-j	125.23a-c	2.52b-h	1.678a-g	12.09cd	520.5a-d
$I_2 \times F_7$	66.88a-e	48.4c-g	0.279c-g	0.204b-h	135.5c-j	120.59b-e	2.794a-f	1.759a-e	13.03a-d	507.7a-e
$I_2 \times F_8$	59.25c-g	49.3b-g	0.316a-f	0.178f-h	122.4g-i	128.83ab	2.98a-d	1.782a-d	13.31a-d	456.1b-f
$I_3 \times F_1$	66.54a-e	53.02a-e	0.363a	0.274a	174.7a	113.28c-g	1.956h	1.354i	10.12e	380.5f
$I_3 \times F_2$	60.25b-g	47.66c-g	0.296b-g	0.249a-c	164a-c	122.26bcd	2.049gh	1.472f-i	11.81de	497.7a-f
$I_3 \times F_3$	70.91ab	55.41abc	0.34a-c	0.211b-h	161.1a-d	126.87abc	2.21f-h	1.633a-h	12.28cd	450b-f
$I_3 \times F_4$	70.72ab	57.2ab	0.334a-c	0.245a-c	170.2ab	118.7b-f	2.744a-f	1.437g-i	12.28cd	413.3d-f
$I_3 \times F_5$	65.15a-f	51.48a-f	0.315a-f	0.222a-e	146.2a-h	119.69b-f	2.362d-h	1.626a-h	12.56b-d	460b-f
$I_3 \times F_6$	67.95a-d	53.58a-d	0.32a-d	0.22b-g	148.1a-h	123.05bcd	2.296e-h	1.553d-i	12.28cd	461.1b-f
$I_3 \times F_7$	72.4a	58.56a	0.297b-g	0.242a-d	158.3a-e	109.83d-h	2.574a-h	1.644a-h	11.72de	455.5b-f
$I_3 \times F_8$	69.8a-c	57.12ab	0.292b-g	0.196c-h	133.1c-j	138.38a	2.611a-g	1.692a-g	12.66b-d	518.3a-e

I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم. F_1، F_2، F_3، F_4، F_5، F_6، F_7 و F_8 به‌ترتیب محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی متانول (۲۵ درصد حجمی)، نانوسیلیکون (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، هیومیک اسید (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، محلول‌پاشی متانول و نانوسیلیکون، محلول‌پاشی متانول و هیومیک اسید، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و هیومیک اسید، محلول‌پاشی متانول با نانوسیلیکون و هیومیک اسید

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری نسبت به هم بر اساس آزمون توکی ندارند.

I_1, I_2 and I_3 are full irrigation, irrigation withholding in heading and booting stages, respectively. F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7 and F8 are foliar application with water as a control, foliar application of methanol (25% by volume), nano silicon (50 mg.L^{-1}), humic acid (300 mg.L^{-1}), foliar application of methanol and nano silicon, methanol and humic acid, nano silicon and humic acid, foliar application of methanol with nano silicon and humic acid, respectively.

Means with similar letters in each column are not significantly different at P≤0.05 (*) and P≤0.01 (**), respectively based on Tukey test.

بخشی از کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید (جدول ۶) به‌واسطه محلول‌پاشی متانول تحت شرایط محدودیت آبی را، می‌توان به افزایش محتوای پرولین (جدول ۷) نسبت داد، زیرا متانول با کاهش pH در گیاه منجر به افزایش فعالیت آنزیم پیرولین ۵- کربوکسیلات سنتتاز شده و در نهایت تجمع پرولین در برگ را افزایش می‌دهد. تجمع پرولین می‌تواند علاوه بر شرکت در تنظیم اسمزی، نقش‌های مهمی مانند حفاظت از سیستم‌های غشایی سلول (Hadi, Seyed Sharifi, & Namvar, 2016) به همراه داشته باشد که همین امر منجر به کاهش هدایت الکتریکی (جدول ۶) و محتوای مالون‌دی‌آلدهید می‌شود (جدول ۶). برخی محققان معتقدند به‌دلیل خاصیت هیدروفیلی پرولین، این مولکول ممکن است جایگزین مولکول‌های آب در اطراف اسیدهای نوکلئیک، پروتئین و مولکول‌های غشایی گردد و از این طریق اثرات یون‌های تخریب‌کننده برای ترکیبات را کاهش داده و موجب محافظت غشاء و ساختار آن از این ترکیبات شود (Hadi *et al*., 2016).

به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی سیلیکون نیز با پاک‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن به‌واسطه بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۶)، ضمن کاهش پراکسید هیدروژن و محتوای مالون‌دی‌آلدهید

(جدول ۶)، موجب می‌شود هدایت الکتریکی از سلول‌های برگ کاهش یابد (جدول ۶). نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان گزارش شده است (Teixeira *et al.*, 2022). در این راستا احمد و همکاران (Ahmed *et al.*, 2023) اظهار داشتند کاربرد سیلیکون از طریق بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار (نظیر پرولین و قندهای محلول) در گیاه، و همچنین بهبود فرآیندهای فتوسنتزی به‌واسطه افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، موجب کاهش تجمع پراکسید هیدروژن و در نتیجه افزایش پایداری غشاء و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی برگ برنج (*Oryza sativa* L.) شد. نینگ و همکاران (Ning *et al.*, 2023) نیز کاهش محتوای مالون دی‌آلدهید برگ گندم به‌واسطه محلول‌پاشی سیلیکون تحت شرایط محدودیت آبی را، به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای اسمولیت‌های سازگار و کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن نسبت دادند.

جدول ۷- مقایسه میانگین تاثیر تعدیل‌کننده‌های تنش و سطوح مختلف آبیاری بر فعالیت آنزیم کاتالاز، محتوای پرولین و رنگیزه‌های فتوسنتزی گندم

Table 7- Means comparison of effects of stress modifiers and irrigation different levels on activity of catalase enzymes, proline and photosynthetic pigments content of wheat

تیمار	کاتالاز ** (OD µg protein min-1) Catalase	پرولین ** ($mg\ g^{-1}FW$) Proline	کلروفیل کل ** ($mg\ g^{-1}\ FW$) Total Chlorophyll	کاروتنوئید ** ($mg\ g^{-1}\ FW$) Carotenoid
I_1	24.75c	6.98b	4.484a	0.386a
I_2	26.22b	7.66a	4.131b	0.362b
I_3	29.99a	7.75a	3.902c	0.339c
F_1	25.6b	6.48c	3.641f	0.332d
F_2	24.72b	7.25bc	3.829ef	0.333d
F_3	26.31b	7.13bc	4.113cde	0.349d
F_4	30.19a	7.45b	4.307bc	0.352cd
F_5	25.49b	7.55b	3.988de	0.362bcd
F_6	26.42b	7.79ab	4.25bcd	0.386ab
F_7	30.14a	7.54b	4.545ab	038abc
F_8	27.03b	8.5a	4.705a	0.403a

I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم. F_1، F_2، F_3، F_4، F_5، F_6، F_7 و F_8 به‌ترتیب محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی متانول (۲۵ درصد حجمی)، نانوسیلیکون (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، هیومیک اسید (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، محلول‌پاشی متانول و نانوسیلیکون، محلول‌پاشی متانول و هیومیک اسید، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و هیومیک اسید، محلول‌پاشی متانول با نانوسیلیکون و هیومیک اسید

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری نسبت به هم بر اساس آزمون توکی ندارند.

I_1, I_2 and I_3 are full irrigation, irrigation withholding in heading and booting stages, respectively. F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7 and F8 are foliar application with water as a control, foliar application of methanol (25% by volume), nano silicon (50 $mg.L^{-1}$), humic acid (300 $mg.L^{-1}$), foliar application of methanol and nano silicon, methanol and humic acid, nano silicon and humic acid, foliar application of methanol with nano silicon and humic acid, respectively.

Means with similar letters in each column are not significantly different at P≤0.05(*) and P≤0.01 (**), respectively based on Tukey test.

احتمالا هیومیک اسید نیز به‌دلیل اثری که بر سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی دارد می‌تواند موجب کاهش آسیب به غشاءهای سلولی و کاهش نشت یونی در گیاهان تحت تنش‌های محیطی شود (García *et al.*, 2016). همچنین، به‌نظر می‌رسد کاربرد هیومیک اسید از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۶ و ۷) و بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (جدول ۶ و ۷)، موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید و نشت الکترولیت از سلول می‌شود (Abu-Ria *et al.*, 2023).

محتوای پرولین و قندهای محلول برگ پرچم: براساس نتایج، محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم) از بیش‌ترین محتوای پرولین برگ پرچم (۷/۷۵ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ) و از افزایش ۱۱/۰۳ درصدی محتوای این صفت نسبت به آبیاری کامل برخوردار بود. همچنین در بین تعدیل‌کننده‌های تنش کاربرد توام متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید از بیش‌ترین محتوای پرولین برگ پرچم (۸/۵ میکروگرم بر گرم وزن تربرگ) و از افزایش ۳۱/۱۷ درصدی این صفت نسبت به عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش برخوردار بودند (جدول ۷). معنی‌دار شدن اثر ترکیب تیماری هر دو عامل مورد بررسی در آزمایش بر محتوای قندهای محلول در سطح احتمال پنج درصد (جدول ۵) و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم، کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش از بیش‌ترین محتوای قندهای محلول (۱۳۸/۳۸ میلی‌گرم برگرم وزن تر برگ) و از افزایش ۲۲/۱۵ درصدی نسبت به عدم محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش در همین سطح از آبیاری برخوردار بود (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد

گرچه در اثر محدودیت آبی، رشد گیاه کند یا متوقف می‌شود ولی به‌منظور فراهمی بیشتر آب، گیاهان تجمع مواد محلول سازگار از جمله پرولین در سلول را افزایش می‌دهند که به این فرآیند تنظیم اسمزی گفته می‌شود (Shaltout, Motawee, Ahmed, & EL-Etreby, 2022). گزارش شده است که تحت شرایط محدودیت آبی، گیاهان بخش اعظم منابع نیتروژن و کربن خود را صرف سنتز تنظیم‌کننده‌های اسمزی از جمله پرولین می‌کنند که فشار تورژسانس سلول‌های خود را حفظ کرده (Altaf *et al*., 2022) و با جلوگیری از تخریب پروتئین‌ها، از غشای سلولی محافظت کنند (Sales *et al*., 2022). از این‌رو پرولین علاوه بر ایفای نقش در حفظ روابط آبی، از اجزای سلولی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن محافظت می‌کند (Hasanuzzaman, 2020). همچنین کاربرد هیومیک اسید در شرایط محدودیت آبی با بهبود فعالیت آنزیم روبیسکو و سنتتاز ATP و همچنین افزایش محتوای کلروفیل، موجب افزایش سرعت انتقال الکترون و سرعت فتوسنتز می‌شود که در چنین شرایطی با افزایش تولید مواد فتوسنتزی، محتوای پرولین و قندهای محلول برگ افزایش می‌یابد (Chen *et al*., 2022). همچنین، گزارش شده است به‌دلیل نقش مهم هیومیک اسید در چرخه عناصر غذایی، متابولیسم نیترات و روند تنفس سلولی و فعالیت شبه‌هورمونی، موجب افزایش محتوای قندها و اسیدهای آمینه می‌شود (Sakr, Ibrahim, ElAwady, & Abo ElMakarem, 2019).

بخشی از افزایش محتوای پرولین به‌واسطه محلول‌پاشی متانول می‌تواند ناشی از تاثیر این ماده در کاهش pH گیاه باشد که با افزایش فعالیت آنزیم پیرولین ۵- کربوکسیلات سنتتاز در نهایت منجر به افزایش تجمع پرولین در برگ می‌شود (Hadi *et al*., 2016). زبیک و همکاران (Zbiec, Karczmarczyk, & Podsiadlo, 2003) نیز اظهار داشتند که محلول‌پاشی متانول از طریق افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و بالا بردن میزان تثبیت CO_2 در گیاه، موجب افزایش فعالیت کربوکسیلاسیون در مقایسه با فعالیت اکسیژناسیون در گیاه شده و همین امر می‌تواند در چنین شرایطی با بهبود فتوسنتز، محتوای قندهای محلول برگی را افزایش دهد. نتایج مشابهی نیز توسط نینگ و همکاران (Ning *et al*., 2023) مبنی بر این‌که نانوسیلیکون از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، ضمن افزایش سرعت فتوسنتز، موجب افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ گندم تحت شرایط محدودیت آبی می‌شود، گزارش شده است. همچنین هیومیک اسید می‌تواند با بهبود جذب نیتروژن سبب افزایش فعالیت آنزیم‌ها، انواع پروتئین‌های شرکت‌کننده در چرخه فتوسنتزی نظیر سیتوکروم‌ها، فردوکسین‌ها، پلاستوسیانین و آنزیم روبیسکو شده و از این طریق رشد گیاه و میزان قندهای محلول را افزایش دهد (Dordas & Sioulas, 2008).

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ پرچم

بیش‌ترین محتوای کلروفیل کل و کارتنوئید (به‌ترتیب ۴/۷۰۵ و ۰/۴۰۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در محلول‌پاشی توام متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید به‌دست آمد، هرچند که اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد در محتوای کلروفیل کل بین این سطح از کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش با کاربرد توام سیلیکون با هیومیک اسید وجود نداشت (جدول ۷). در بین سطوح آبیاری نیز، بیش‌ترین محتوای کلروفیل کل و کارتنوئید (به‌ترتیب ۴/۴۸۴ و ۰/۳۸۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد (جدول ۷).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد در شرایط محدودیت شدید آبی، بیش‌ترین محتوای کلروفیل a و کلروفیل b برگ پرچم (به‌ترتیب ۲/۶۱۱ و ۱/۶۹۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در محلول‌پاشی توام تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) مشاهده شد (جدول ۶)، که از افزایش به‌ترتیب ۳۳/۴۸ و ۲۴/۹۶ درصدی محتوای کلروفیل a و b در مقایسه با عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش در همین سطح از محدودیت آبی برخوردار بود (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی، تجمع بیشتر گونه‌های فعال اکسیژن از جمله پراکسید هیدروژن و افزایش غلظت اتیلن با جلوگیری از بیوسنتز کلروفیل و افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز، موجب کاهش و تجزیه محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاهان می‌شود (Sachdev, Ansari, Ansari, Fujita, & Hasanuzzaman, 2021). در این رابطه توران و همکاران (Turan *et al*., 2023) اظهار داشتند که وقوع محدودیت آبی از طریق اختلال در جذب عناصر غذایی و افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، موجب پراکسیداسیون لیپیدی و تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود. بخشی از افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی به‌واسطه کاربرد هیومیک اسید می‌تواند ناشی از بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش محتوای پراکسید هیدروژن، محتوای مالون‌دی‌آلدهید و نشت الکترولیت از سلول‌های برگ (جدول ۶ و ۷) و تسریع در جذب و متابولیسم بهتر نیتروژن و تولید پروتئین‌های محافظت‌کننده باشد (Haghighi, Kafi, & Fang, 2012). کایا و همکاران (Kaya *et al*., 2020) نیز افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ ذرت (*Zea mays* L.) به‌واسطه کاربرد هیومیک اسید را به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش محتوای پراکسید هیدروژن، محتوای مالون‌دی‌آلدهید و هدایت الکتریکی از سلول‌های برگ نسبت دادند. رمبری و همکاران (Rambery *et al*., 2002) بیان کردند که افزایش محتوای کلروفیل در شرایط محلول‌پاشی با متانول می‌تواند با اکسیداسیون متانول در ارتباط باشد، زیرا وقتی بوته‌ها در شرایط محدودیت آبی به‌دلیل بسته شدن روزنه‌ها با کاهش دی‌اکسیدکربن

درون برگی روبه‌رو می‌شوند، در این شرایط متانول به‌راحتی توسط عصاره برگ به فرمالدئید اکسید شده و در دسترس گیاه قرار می‌گیرد و با کاهش تنش اکسیداتیو، موجب افزایش محتوای کلروفیل می‌شود. بوخاری و همکاران (Bukhari *et al.*, 2021) گزارش کردند که کاربرد منابع خارجی سیلیکون در شرایط خشکی، به‌دلیل ارتقای پرولین، قندهای محلول و سطوح کاروتنوئیدها در گندم، ضمن کمک به جذب آب و کاهش اثرات تنش اکسیداتیو ناشی از محدودیت آبی، منجر به افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل و فتوسنتز خالص در مقایسه با بوته‌های تیمارنشده می‌شود.

به‌نظر می‌رسد بخشی از افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (جدول ۶ و ۷) به‌واسطه کاربرد سیلیکون ناشی از اثر این ماده بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۶ و ۷)، محتوای پرولین و قندهای محلول (جدول ۶ و ۷) و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی (جدول ۶) باشد. نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان گزارش شده است (Shen *et al.*, 2022). در این راستا جلیل و همکاران (Jalil *et al.*, 2023) افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ برنج به‌واسطه کاربرد نانوسیلیکون را به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش جذب عناصر غذایی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی نسبت دادند. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2021) اظهار داشتند که استفاده از سیلیکون نقش غیرقابل‌انکاری در کاهش صدمات گونه‌های فعال اکسیژن تحت شرایط تنش خشکی دارد که نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نیز در این راستا بود.

درصد پروتئین برگ پرچم

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی توام تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) در هر یک از سطوح آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم) موجب افزایش به‌ترتیب ۱۹/۷۴، ۵/۱۳ و ۲۵/۰۹ درصدی محتوای پروتئین برگ پرچم نسبت به عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم شد (جدول ۶). بخشی از کاهش محتوای پروتئین‌های برگی در شرایط محدودیت آبی می‌تواند به اثر این تنش بر افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدهید و یا پراکسیداسیون لیپیدی و همچنین افزایش هدایت الکتریکی یا افزایش نشتی غشاها نسبت داده شود (جدول ۶). کاهش محتوای پروتئین‌های محلول موجود در برگ اغلب گیاهان تحت شرایط محدودیت آبی می‌تواند به‌دلیل کاهش سنتز پروتئین‌ها، تجزیه آن‌ها به‌دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های پروتئاز و کاهش میزان اسیدهای آمینه باشد (Mafakheri, Siosemardeh, Bahramnejad, Struik, & Sohrabi, 2010).

از طرفی محتوای پروتئین تابعی از نیتروژن گیاه است، از این‌رو به‌نظر می‌رسد کاربرد هیومیک اسید با بهبود جذب و انتقال نیتروژن موجب افزایش محتوای پروتئین موجود در گیاه شده است (Ayman, Kamar, & Khalid, 2009). آنان همچنین اظهار داشتند که محلول‌پاشی هیومیک اسید از طریق سنتز ترکیبات آلی نیتروژن‌دار و بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، موجب افزایش محتوای پروتئین محلول شد. بخشی از افزایش محتوای پروتئین در اثر محلول‌پاشی متانول می‌تواند ناشی از نقش باکتری‌های متیلوتروف[1] موجود در برگ گیاهان باشد که با مصرف متانول به‌عنوان ماده مغذی، قادر به تولید هورمون‌های اکسین و سیتوکینین در برگ بوده که در افزایش پروتئین‌سازی نقش اساسی دارند (Madhaiyan, Poonguzhali, Sundaram, & Sa, 2006). نریمانی و همکاران (Narimani *et al.*, 2020) افزایش محتوای پروتئین برگ گندم تحت شرایط محدودیت آبی به‌واسطه محلول‌پاشی متانول را، به بهبود سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی (فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار)، کاهش تجمع پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید نسبت دادند.

بخش دیگری از بهبود محتوای پروتئین برگ به‌واسطه کاربرد سیلیکون را می‌توان به بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه نسبت داد که با جلوگیری از تجمع پراکسید هیدروژن و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی، موجب افزایش پایداری غشاء و محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود که در چنین شرایطی با بهبود سرعت فتوسنتز، محتوای پروتئین برگ افزایش می‌یابد (Ahmed *et al.*, 2023). نینگ و همکاران (Ning *et al.*, 2023) نیز بیان کردند که محلول‌پاشی سیلیکون در شرایط محدودیت آبی از طریق بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۶ و ۷)، تجمع پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپیدی (جدول ۶) را کاهش داده و ضمن بهبود سرعت فتوسنتز، موجب افزایش محتوای پروتئین برگ گندم شد.

عملکرد دانه

براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، محلول‌پاشی توام متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید در هر یک از سطوح آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم) از بیش‌ترین عملکرد دانه (به‌ترتیب ۵۹۲/۲، ۴۶۸/۱ و ۵۱۸/۳ گرم در مترمربع) و از افزایش به‌ترتیب ۳۴، ۱۵/۴ و ۳۶ درصدی نسبت به عدم محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم برخوردار بود (جدول ۶). بخشی از افزایش عملکرد دانه در کاربرد متانول می‌تواند ناشی از متابولیزه شدن سریع آن به دی‌اکسیدکربن در بافت‌های گیاهی (Galbally & Kirstine, 2002) باشد که موجب

1- *Methylobacterium* spp

می‌شود تا میل ترکیبی روبیسکو با مولکول‌های CO_2 نسبت به O_2 بیشتر شده و ضمن افزایش فتوسنتز، منجر به کاهش تنفس نوری و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن (Saneinejad *et al.*, 2019) و بهبود راندمان کربوکسیلاسیون و سرعت فتوسنتز و در نهایت به افزایش عملکرد دانه کمک نماید. بخش دیگری از افزایش عملکرد دانه در شرایط محدودیت آبی با کاربرد سیلیکون و هیومیک اسید را، می‌توان به بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و اسمولیت‌های سازگار (جدول ۶ و ۷)، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۶ و ۷) و کاهش تجمع گونه‌های فعال و پراکسیداسیون لیپیدی (جدول ۶) نسبت داد. نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان به‌واسطه کاربرد سیلیکون و هیومیک اسید در شرایط محدودیت آبی گزارش شده است (Ahmed *et al.*, 2023). محمدی کله‌سرلو همکاران (Mohammadi Kale Sarlou *et al*, 2022) نیز افزایش عملکرد دانه تریتیکاله در محلول‌پاشی هیومیک اسید را به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) و محتوای اسمولیت‌های سازگار، و کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید نسبت دادند. تکسیرا و همکاران (Teixeira *et al.*, 2022) نیز علل اصلی بهبود عملکرد دانه در شرایط خشکی به‌واسطه محلول‌پاشی سیلیکون را، به کاهش محتوای پراکسید هیدروژن، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین و رنگیزه‌های فتوسنتزی را در شرایط خشکی نسبت دادند.

نتیجه‌گیری

محدودیت آبی (قطع آبیاری در مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم) گرچه محتوای مالون‌دی‌آلدهید، پراکسید هیدروژن، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار را افزایش داد، ولی تحت چنین شرایطی کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش موجب تشدید فعالیت این آنزیم‌ها و اسمولیت‌های سازگارشده ولی محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد و همین عوامل موجب شد تا محلول‌پاشی توام تعدیل‌کننده‌های تنش (متانول، نانوسیلیکون و هیومیک اسید) در شرایط محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مرحله تورم غلاف برگ پرچم) و آبیاری کامل، موجب افزایش به‌ترتیب ۳۶/۲۱ و ۳۲/۷ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی تعدیل‌کننده‌های تنش در این سطوح از آبیاری شود. از این‌رو به‌نظر می‌رسد کاربرد کاربرد منفرد و تلفیقی تعدیل‌کننده‌های تنش می‌تواند عملکرد دانه گندم در شرایط آبیاری کامل و محدودیت آبی را، به‌واسطه بهبود فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی دیگر از صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی افزایش دهد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نگارندگان وظیفه خود می‌دانند مراتب سپاس و قدردانی خود را از مساعدت‌های صمیمانه و خالصانه یکایک همکاران ارجمند در اجرای این طرح در بخش‌های مختلف مزرعه‌ای و آزمایشگاهی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی و ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل (آلاروق) اعلام دارند.

References

1. Abdel Mawgoud, A. M. R., El Greadly, N. H. M., Helmy, Y. I., & Singer, S. M. (2007). Responses of tomato plants to different rates of humic based fertilizer and NPK fertilization. *Journal of Applied Sciences Research*, *3*(2), 169-174.
2. Abu-Ria, M., Shukry, W., Abo-Hamed, S., Albaqami, M., Almuqadam, L., & Ibraheem, F. (2023). Humic acid modulates ionic homeostasis, osmolytes content, and antioxidant defense to improve salt tolerance in rice. *Plants*, *12*(9), 1834. https://doi.org/10.3390/plants12091834
3. Aggag, A. M., Alzoheiry, A. M., & Abdallah, A. E. (2015). Effect of kaolin and fulvic acid anti-transpirants on tomato plants grown under different water regimes. *Alexandria Science Exchange Journal*, *36*(2), 2-15. https://doi.org/10.21608/asejaiqjsae.2015.2875
4. Aghaei, F., Seyed Sharifi, R., Khomari, S., & Narimani, H. (2021). Effects of methanol on grain yield, chlorophyll fluorescence indices and some physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigation withholding conditions. *Journal of Crop Production*, *3*(4), 151-172. https://doi.org/10.22069/EJCP.2021.18631.2382
5. Ahluwalia, O., Singh, P. C., & Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, *5*, 100032. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032
6. Ahmadi-Nouraldinvand, F., Seyed Sharif, R., Siadat, S. A., & Khalilzadeh, R. (2023). Reduction of salinity stress in wheat through seed bio-priming with mycorrhiza and growth-promoting bacteria and its effect on physiological traits and plant antioxidant activity with silicon nanoparticles application. *Silicon*, 1-9. https://doi.org/10.1007/s12633-023-02552-x
7. Ahmed, S. F., Biswas, A., Ullah, H., Himanshu, S. K., Tisarum, R., Cha-um, S., & Datta, A. (2023). Interactive

effects of silicon and potassium on photosynthesis and physio-biochemical traits of rice (*Oryza sativa* L.) leaf mesophyll under ferrous iron toxicity. *Plant Stress*, *10*, 100203. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100203
8. Aldesuquy, H., & Ghanem, H. (2015). Exogenous salicylic acid and trehalose ameliorate short-term drought stress in wheat cultivars by up-regulating membrane characteristics and antioxidant defense system. *Journal of Horticulture*, *2*(2), 139. https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000139
9. Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell & Environment*, *24*(12), 1337-1344. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x
10. Altaf, M. A., Shahid, R., Ren, M. X., Naz, S., Altaf, M. M., Khan, L. U., Tiwari, P. K., Lal, M. K., Shahid, M. A., Kumar, R., Nawaz, M. A., Jahan, M. S., Jan, B. L., & Ahmad, P. (2022). Melatonin improves drought stress tolerance of tomato by modulating plant growth, root architecture, photosynthesis, and antioxidant defense system. *Antioxidants*, *11*(2), 1-16. https://doi.org/10.3390/antiox11020309
11. Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, *24*(1), 1-15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1
12. Ayman, M., Kamar, M., & Khalid, M. (2009). Amino and humic acids promote growth, yield and disease resistance of faba bean cultivated in clay soil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, *3*(2), 731-739.
13. Bates, L. S., Walderen, R. D., & Taere, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060
14. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*(1-2), 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3
15. Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M., Jatoi1, W. N., Malghani, N. A., Shah, A. N., & Manan, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. *Silicon*, *13*, 4757-4772. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4
16. Chen, Q., Qu, Z., Ma, G., Wang, W., Dai, J., Zhang, M., Wei, Z., & Liu, Z. (2022). Humic acid modulates growth, photosynthesis, hormone and osmolytes system of maize under drought conditions. *Agricultural Water Management*, *263*, 107447. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107447
17. Cordeiro, F. C., Santa-Catarina, C., Silveira, V., & de Souza, S. R. (2011). Humic acid effect on catalase activity and the generation of reactive oxygen species in corn (*Zea mays*). *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, *75*(1), 70-74. https://doi.org/10.1271/bbb.100553
18. Dordas, C., & Sioulas, S. (2008). Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis and water efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions. *Industrial Crops and Products*, *27*(1), 78-85. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.020
19. Dorokhov, Y. L., Sheshukova, E. V., & Komarova, T. V. (2018). Methanol in plant life. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 1-16. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01623
20. Dubios, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Roberts, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, *28*(3), 350-356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017
21. Galbally, I. E., & Kirstine, W. (2002). The production of methanol by flowering plants and the global cycle of methanol. *Journal of Atmosphere Chemistry*, *43*(3), 195-229. https://doi.org/10.1023/A:1020684815474
22. García, A. C., Olaetxea, M., Santos, L. A., Mora, V., Baigorri, R., Fuentes, M., & Garcia-Mina, J. M. (2016). Involvement of hormone-and ROS-signaling pathways in the beneficial action of humic substances on plants growing under normal and stressing conditions. *BioMed Research International*, *37*, 1-13. https://doi.org/10.1155/2016/3747501
23. Hadi, H., Seyed Sharifi, R., & Namvar, A. (2016). *Phytoprotectants & abiotic stresses*. Urmia University. 252 pp.
24. Haghighi, M., Kafi, M., & Fang, P. (2012). Photosynthetic activity and N metabolism of lettuce as affected by humic acid. *International Journal of Vegetable Science*, *18*(2): 182-189. https://doi.org/10.1080/19315260.2011.605826
25. Hasanuzzaman, M. (2020). *Agronomic crops: stress responses and tolerance*. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
26. Hossinzadeh, S. R., Salimi, A., Ganjali, A., & Ahmadpour, R. (2015). Effects of foliar application of methanol on biochemical characteristics and antioxidant enzyme activity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, *1*(1), 17-30. (in Persian with English abstract).
27. Jalil, S., Nazir, M. M., Al-Huqail, A. A., Ali, B., Al-Qthanin, R. N., Asad, M. A. U., Ewwda, M. A., Zulfiqar, F., Onuesal, N., Masood, H. A., Yong, J. W., & Jin, X. (2023). Silicon nanoparticles alleviate cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by modulating the nutritional profile and triggering stress-responsive genetic mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *268*, 115699. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115699
28. Kaya, C., Senbayram, M., Akram, N. A., Ashraf, M., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2020). Sulfur-enriched leonardite and humic acid soil amendments enhance tolerance to drought and phosphorus deficiency stress in

maize (*Zea mays* L.). *Scientific Reports*, *10*(1): 6432. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62669-6
29. Korgaonkar, S., & Bhandari, R. (2023). Drought stress in plants: Effects and tolerance. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *19*(1), 5-17.
30. Liu, M., Zhao, G., Huang, X., Pan, T., Chen, W., Qu, M., Ouyang, B., Yu, M., & Shabala, S. (2023). Candidate regulators of drought stress in tomato revealed by comparative transcriptomic and proteomic analyses. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1282718. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1282718
31. Ma, D., Sun, D., Wang, Ch., Qin, H., Ding, H., Li, Y., & Gou, T. (2015). Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. *Journal of Plant Growth Regulation*, *35*(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/s00344-015-9500-2
32. Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Sundaram, S. P., & Sa, T. A. (2006). New insight into foliar applied methanol influencing phylloplane methylotrophic dynamics and growth promotion of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Environmental and Experimental Botany*, *57*(1-2), 168-176. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.05.010
33. Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P. C., & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, *4*(8), 580-585.
34. Manal, F. M., Thalooth, A. T., Amal, A. G., Magda, H. M., & Elewa, T. A. (2016). Evaluation of the effect of chemical fertilizer and humic acid on yield and yield components of wheat plants (*Triticum aestivum*) grown under newly reclaimed sandy soil. *International Journal of ChemTech Research*, *9*(8), 154-161.
35. Mohammadi Kale Sarlou, S., Seyed Sharifi, R., & Narimani, H. (2022). Effects of *Flavobacterim*, vermicompost and humic acid on antioxidant enzymes activity and some biochemical traits of triticale under salinity conditions. *Crop Production Journal*, *15*(2), 183-202. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/EJCP.2022.19669.2469
36. Narimani, H., Seyed Sharifi, R., & Aghaei, F. (2020). Effect of methanol on antioxidant enzymes activity, some compatible osmolytes and biochemical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigation withholding conditions. *Journal of Crop Physiology*, *12*(47), 99-114. (in Persian with English abstract).
37. Nazari, Z., Seyed Sharifi, R., Narimani, H., & Mohammadi Kale Sarlou, S. (2022). Effect of water limitation, biofertilizers, and nano silicon on compatible osmolytes and biochemical traits of X *Triticosecale*. *Journal of Crops Improvement*, *24*(4), 1199-1215. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jci.2022.333768.2639
38. Ning, D., Zhang, Y., Li, X., Qin, A., Huang, C., Fu, Y., Gao, Y., & Duan, A. (2023). The effects of foliar supplementation of silicon on physiological and biochemical responses of winter wheat to drought stress during different growth stages. *Plants*, *12*(12), 2386. https://doi.org/10.3390/plants12122386
39. Nonomura, A. M., & Benson, A. A. (1992). The path of carbon in photosynthesis: Improved crop yields with methanol. *National Academic Science*, *89*, 9794-9798. https://doi.org/10.1073/pnas.89.20.9794
40. Okeke, E. S., Nweze, E. J., Ezike, T. C., Nwuche, C. O., Ezeorba, T. P. C., & Nwankwo, C. E. I. (2023). Silicon-based nanoparticles for mitigating the effect of potentially toxic elements and plant stress in agro ecosystems: A sustainable pathway towards food security. *Science of the Total Environment*, *898*, 165446. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165446
41. Rahbarian, R., Khavari-Nejad, R., Ganjeali, A., Bagheri, A. R., & Najafi, F. (2011). Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Acta Biologica Cracoviensia*, *53*(1), 47-56. https://doi.org/10.2478/v10182-011-0007-2
42. Rambery, H. A., Bradley, J. S. C., Olson, J. N., Nishio, J., Markwell, J., & Dstermen, J. C. (2002). The role of methanol in promoting plant growth: An update. *Journal of Plant Biochemistry and Biocenology*, *1*, 113-126.
43. Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, *10*(2), 277. https://doi.org/10.3390/antiox10020277
44. Sakr, M. T., Ibrahim, H. M., ElAwady, A. E., & Abo ElMakarem, A. A. (2019). Effect of humic acid, seaweed extract and essential oils as antioxidants on pre-and post-harvest quality of red radish plants. *Horticulture International Journal*, *3*(3), 129-138. https://doi.org/10.15406/hij.2019.03.00120
45. Sales, E., Cañizares, E., Pereira, C., Pérez-Oliver, M. A., Nebauer, S. G., Pavlović, I., Novák, O., Segura, J., & Arrillaga, I. (2022). Changing temperature conditions during somatic embryo maturation result in *Pinus pinaster* plants with altered response to heat stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(3), 1-16. https://doi.org/10.3390/ijms23031318
46. Saneinejad, A. A., Tohidi, M., Habibi Khaniani, B., Sadeghi, M., & Khoramian, M. (2019). The effect of methanol foliar application on some physiological traits of cowpea bean (*Vigna unguiculata* L.) under drought stress conditions. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, *15*(1), 45-61. (in Persian with English abstract).
47. Seyed Sharifi, R., & Khalilzadeh, R. (2018). *Cereal Crops Production*. University of Mohaghegh Ardabili (UMA). 508 pp.

48. Shahmarzadeh, Sh., Seyed Sharifi, R., & Sedghi, M. (2022). The effect of mycorrhiza and humic acid on chlorophyll content and grain filling components of wheat (*Triticum aestivum* L.) in various irrigation levels. *Plant Echophysiology Journal*, *14*, 47-59.
49. Shaltout, K., Motawee, M., Ahmed, D., & EL-Etreby, M. (2022). Effect of foliar spray with K and Mn on the growth of *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq. under different drought levels. *Journal of Basic Environmental Science*, *9*(1), 1-11.
50. Shen, Z., Pu, X., Wang, S., Dong, X., Chen, X., & Cheng, M. (2022). Silicon improves ion homeostasis and growth of liquorice under salt stress by reducing plant Na^+ uptake. *Scientific Reports*, *12*(1), 5089. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09061-8
51. Stewart, R. C., & Beweley, J. D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, *65*(2), 245-248. https://doi.org/10.1104/pp.65.2.245
52. Sudhakar, C., Lakshmi, A., & Giridara Kumar, S. (2001). Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. *Plant Science*, *167*(3), 613-619. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00450-2
53. Teixeira, G. C. M., de Prado, R. M., Rocha, A. M. S., Filho, A. S. B. O., Junior, G. S. S., & Gratão, P. L. (2022). Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water defcit in sugarcane and energy cane plants. *Scientific Reports*, *12*(1), 17487. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9
54. Turan, M., Ekinci, M., Argin, S., Brinza, M., & Yildirim, E. (2023). Drought stress amelioration in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings by biostimulant as regenerative agent. *Frontiers in Plant Science*, *14*(15), 121-131. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211210
55. Wang, M., Wang, R., Jose Mur, L. A., Ruan, J., Shen, Q., & Shiwei Guo, Sh. (2021). Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research*, *8*, 254. https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1
56. Xu, R., Huang, J., Guo, H., Wang, C., & Zhan, H. (2023). Functions of silicon and phytolith in higher plants. *Plant Signaling & Behavior*, *18*(1), e2198848. https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2198848
57. Yuan, T., Wang, J., Sun, X., Yan, J., Wang, Z., & Niu, J. (2017). Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, *25*(3), 74-82. https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160700
58. Zbiec, L., Karczmarczyk, S., & Podsiadlo, C. (2003). Response of some cultivated plants to methanol as compared to supplemental irrigation. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities Agronomy*, *6*(1), 1-7.